

prof. dr hab. inż. Jerzy MERKISZ
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechniki Poznańskiej
tel.: (+48) 61 665-20-04
e-mail: jerzy.merkisz@put.poznan.pl

RECENZJA

**Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Gęcy
nt.: „Wpływ doładowania na wskaźniki pracy
silnika benzynowego o kontrolowanym samozapłonie”**

Podstawa opracowania: pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej WM/40/2021 z dnia 02.03.2021, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej

1. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU ROZPRAWY

Przełom XX/XXI wieku przejdzie z pewnością do historii rozwoju motoryzacji jako okres intensywnych prac badawczo-rozwojowych nad pojazdami o niskiej lub wręcz zerowej emisji toksycznych składników spalin zasilanych paliwami alternatywnymi i wykorzystujących niekonwencjonalne źródła napędu. Głównym aspektem tych działań jest wzrastająca świadomość zagrożeń dla środowiska naturalnego – w jego obronie tworzą się akty prawne, określające poziomy dopuszczalnych emisji toksycznych składników spalin w określonych grupach i kategoriach pojazdów.

Wobec przewidywanego wzrostu liczby pojazdów na świecie oraz zapotrzebowania na paliwa silnikowe można sądzić, że globalna emisja spalin silnikowych będzie nadal wzrastać, a ekologiczna presja wywierana na producentów silników będzie się nasilać. Dla spełnienia wymagań ekologicznych nie wystarczają już pojedyncze środki – niezbędne są rozwiązania kompleksowe. Obserwuje się „zbliżenie” konstrukcyjne silników ZI i ZS, prowadzące do wykorzystania zalet i eliminacji wad obu typów silników. Obejmuje ono obecnie przede wszystkim rozwiązania konstrukcyjne, ale w przyszłości obejmie szczególnie proces spalania, czego przykładem są systemy spalania CAI (Controlled Auto-Ignition – sterowany samozapłon paliwa) i HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) – system spalania ładunku homogenicznego w silniku ZS.

W systemie HCCI paliwo jest wtryskiwane w kolektorze dolotowym, w celu uzyskania częściowej homogenizacji ładunku przed wystąpieniem spalania. Początkiem spalania steruje się na drodze pośredniej przez wpływ na parametry termodynamiczne ładunku

(ujednorodnienie stężenia par paliwa, tak aby ich wartości w różnych miejscach komory spalania nie odbiegały od wartości średnich). Lokalnie muszą oczywiście istnieć niewielkie strefy z $\lambda < 1$, aby w ogóle wystąpił samozapłon. Poza tym nie można dopuścić do wzrostu szybkości wywiązywania się ciepła w wyniku homogenizacji, bo spowodowałoby to intensywne tworzenie się tlenków azotu. Podczas całego obiegu średnia temperatura ma być niższa od 2000 K, a tlenu jest więcej niż potrzeba do całkowitego spalania wtrysniętej dawki paliwa. Jeżeli spalanie zachodziłoby więc w całej objętości komory spalania, panujące temperatury byłyby za niskie, aby mogły wytworzyć się NO_x , a dzięki dużemu nadmiarowi tlenu nie doszłoby do powstania PM. Metoda ta przyspiesza spalanie i polepsza rozkład temperatury w przestrzeni spalania, jednocześnie pozwala spalać duże dawki paliwa z ograniczeniem wtrysku paliwa do płomienia. Ośrodki rozwijające koncepcję spalania CAI i HCCI coraz częściej wskazują na potrzebę opracowania nowego paliwa, łączącego dobrą odparowalność z dużą zdolnością do samozapłonu.

W rozprawie doktorskiej podjęto aktualny i ważny, z naukowego i praktycznego punktu widzenia, problem analizy czynników wpływających na przebieg niskotemperaturowego spalania w tłokowym silniku o kontrolowanym samozapłonie mieszanki oraz opracowanie sposobów sterowania procesem roboczym. Problem ten jest rozwiązywany przez dużą liczbę ośrodków naukowych, badawczych i przemysłowych. Znaczna część publikacji ukazujących się na całym świecie wskazuje na dużą konkurencję w tym zakresie. Zagadnieniom tym poświęcono recenzowaną pracę. Jeżeli uwzględnić powyższe stwierdzenia – jej tematyka, cele i zakres są wybrane trafnie.

W świetle analizy międzynarodowych dokumentów i światowej literatury zagadnienia uważam, że rozprawa mgr. inż. Michała Gęcy jest oryginalnym osiągnięciem Autora i wnosi wartościowe elementy w nurt badań nad „nietypowymi” systemami spalania.

Z powodu wyraźnego nacisku przez społeczeństwo na stworzenie silników spalinowych, spełniających cel „Technologies and Policies towards Zero-Impact Combustion Engines”, problem ten jest rozwiązywany przez bardzo dużą liczbę ośrodków naukowych, badawczych i przemysłowych. Duża liczba publikacji ukazujących się na całym świecie wskazuje na ogromną konkurencję w tym obszarze tematycznym. Nie ulega zatem wątpliwości, iż tematyka ocenianej rozprawy, jej cele i zakres są wybrane wyjątkowo trafnie i to zarówno ze względu na aspekt naukowy jak i utylitarny.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawarta na 117 stronach maszynopisu, w którym uwzględniono streszczenie pracy w języku polskim oraz angielskim (4 strony) oraz spis źródeł literaturowych składający się ze 138 pozycji naukowych (12 stron). Z pośród 138 pozycji naukowych znajduje się 130 artykułów, 5 książek, 3 odnośniki do stron internetowych oraz jeden patent. 135 literaturowych jest w języku angielskim oraz 3 w języku polskim.

Cel pracy został jasno sformułowany z wyraźnym zaznaczeniem zagadnienia nowości, odpowiednio dla rozpraw naukowych.

W pracy przedstawiono aspekt historyczny wykorzystania systemu spalania HCCI (ang. homogeneous charge compression ignition) i CAI (ang. controlled auto-ignition), oraz wyjaśniono stosowaną terminologię odnośnie tych systemów spalania. Dodatkowo Autor

opisuje różnice pomiędzy klasycznymi systemami spalania oraz niskotemperaturowym systemem spalania z wyszczególnieniem ich zalet oraz wad. Wstęp zawiera również przegląd literatury pod kątem badaczy oraz ośrodków badawczych zajmujących się niskotemperaturowymi systemami spalania.

Następnie zamieszczono analizę stanu wiedzy. Opisano zagadnienia zakresu pracy silnika spalinowego z naciskiem na badania pokazujące zestawienia zakresu pracy silnika dla różnych systemów spalania. Dalej opisano czynniki ograniczające zakres pracy silnika w trybie kontrolowanego samozapłonu, tj.: napełnienie cylindra, szybkość przyrostu ciśnienia, zmienność cykliczna procesu roboczego, emisja składników toksycznych spalin. Scharakteryzowano czynniki wpływające na przebieg procesu roboczego w silniku o kontrolowanym samozapłonie, tj.: fazy rozrządu, skład mieszaniny palnej, uwarstwienie ładunku w cylindrze, rodzaj paliwa i jego właściwości, reformowanie paliwa. Na zakończenie podsumowano stan wiedzy oraz potencjał niskotemperaturowego systemu spalania oraz zwrócono uwagę na problemy związane ze sterowaniem procesem roboczym silników CAI.

Celem ogólnym pracy było rozpoznanie czynników wpływających na przebieg niskotemperaturowego spalania w tłokowym silniku o kontrolowanym samozapłonie mieszanki oraz opracowanie sposobów sterowania procesem roboczym w warunkach zwiększonych obciążeń. W pracy postawiono następującą tezę badawczą: „Zastosowanie doładowania silnika o kontrolowanym samozapłonie mieszanki paliwowo-powietrznej umożliwia uzyskiwanie większych obciążeń niż przy zasilaniu silnika powietrzem pod ciśnieniem atmosferycznym, a odpowiedni sposób tworzenia mieszanki w cylindrze pozwala na właściwe ukształtowanie procesu wywiązywania się ciepła oraz minimalizację emisji toksycznych składników spalin”.

Dla realizacji celu pracy i zweryfikowania tezy zrealizowano poniższe zadania badawcze:

- Przygotowanie stanowiska badawczego z silnikiem CAI. Doposażenie stanowiska w sprężarkę pozwalającą na uzyskanie zmiennego ciśnienia w układzie dolotowym z układem kondycjonowania temperatury.
- Przeprowadzenie badań empirycznych na stanowisku badawczym.
- Analiza uzyskanych wyników i zaproponowanie najkorzystniejszych nastaw umożliwiających pracę silnika ze zwiększonymi obciążeniami przy jednoczesnym zachowaniu dopuszczalnych szybkości narastania ciśnienia oraz emisji toksycznych składników spalin.

Zawarto w pracy szczegółowy opis silnika, na którym Autor wykonał badania eksperymentalne oraz przedstawiono zrealizowane badania z uwzględnieniem metod pozyskiwania wyników.

Badania empiryczne podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie badano zmienne ciśnienia w układzie dolotowym silnika. Na tym etapie analizowano wpływ doładowania na proces roboczy oraz emisję składników toksycznych. Autor zauważył, że zwiększenie ciśnienia w układzie dolotowym pozwoliło na pracę silnika CAI w szerszym obszarze osiąganych obciążeń, niż w przypadku atmosferycznego zasilania w powietrze. Niestety towarzyszącym efektem większej ilości energii dostarczonej do cylindra był znaczący przyrost wskaźnika twardości spalania. Obniżenie twardości pracy możliwe było poprzez uwarstwienie ładunku w cylindrze, lecz pojawiły się niekorzystne skutki uwarstwienia

w postaci zwiększonej emisji tlenków azotu. Ponadto, na skutek dużej emisji CO zmniejszyła się sprawność spalania. Drugi etap pracy wynikał z chęci obniżenia ilości ciepła generowanego w czasie ujemnego współotwarcia zaworów (UWZ). Efekt taki doktorant uzyskał redukując ilości paliwa wtryskiwanego do sprężanych spalin co było powodem przeprowadzenia badań przy zmiennej dawce paliwa wtryskiwanego w czasie UWZ. Autor zauważył, że przy zmiennej dawce pilotującej paliwa można stwierdzić, że zmniejszenie dawki podawanej we wczesnej fazie UWZ jest korzystne zarówno z punktu widzenia twardości spalania, jak i emisji toksycznych składników spalin. Ponadto minimalizując dawkę pilotującą uzyskano znaczącą poprawę sprawności cieplnej.

Praca kończy się podsumowaniem, w którym Autor odniósł się do uzyskanych wyników badań.

3. OCENA ROZPRAWY

Uwagi ogólne

Pod względem merytorycznym i metodycznym pracę oceniam wysoko – zawiera ona nieliczne niedociągnięcia, błędy i usterki, które nie rzutują na ogólną ocenę pracy. Układ logiczny rozprawy odpowiada tokowi przeprowadzanych analiz i badań i jest typowym, klasycznie prawidłowym metodycznie ciągiem czynności badawczych, zapewniającym klarowny układ treści pracy bez luk i powtórzeń. Na podkreślenie zasługuje staranne „podbudowanie” sformułowania celu pracy i wynikającego stąd jej zakresu. Autor przeprowadził eksperymenty mające zarówno wartość naukową jak i utylitarną.

Zalety pracy:

- Wpisuje się ona w aktualne trendy rozwoju silników spalinowych pod kątem dostosowania ich do obowiązujących norm ekologicznych.
- Poruszono nowatorskie podejście do systemów spalania w silnikach tłokowych; niskotemperaturowe spalanie jest tematem badań znaczących ośrodków badawczych, koncernów oraz uniwersytetów tj: Sandia National Laboratories Combustion Research Facility w Livermore, General Motors, Advanced Combustion Concepts-Enabling System and Solutions (ACCESS); do komercjalizacji koncepcji CAI i HCCI przyczynił się również koncern Mazda, który w ostatnich latach wyprodukował silnik Skyactiv-X wykorzystujący kontrolowany samozapłon.
- Zrealizowano szeroki zakres badań eksperymentalnych uwzględniających wiele czynników wpływających na proces spalania niskotemperaturowego.
- Wyjaśniono złożone zjawiska cieplne, wynikające z różnych sposobów tworzenia mieszanki, obejmujące ujemne współotwarcie zaworów, proces dolotu oraz proces spalania.
- Wyniki badań przyczyniły do poszerzenia wiedzy na temat zaawansowanych metod sterowania spalaniem w silniku CAI oraz pozwoliły na wskazanie sposobów sterowania spalaniem, aby uzyskać dużą sprawność, małą emisję spalin oraz akceptowalną twardość pracy.
- Ponadto te badania dostarczyły danych pozwalających na lepsze zrozumienie mechanizmów tworzenia mieszanki i spalania w zakresie zwiększonych obciążeń silnika, gdzie pojawiają się ograniczenia w postaci zwiększonych szybkości narastania ciśnienia i emisji spalin.

Uwagi krytyczne:

Po zapoznaniu się z treścią pracy chciałbym podjąć polemikę z Autorem nad zaprezentowanymi przez niego wybranymi rozważaniami i opiniami:

1. Przegląd literatury jest nadmiernie rozbudowany. Autor może wykorzystać wiedzę w tym zakresie do opracowania osobnej monografii naukowej, ale w dysertacji nie była ona konieczna.
2. Treść pracy doktorskiej oraz wykonane badania wykraczają poza tematykę sugerowaną przez tytuł. Zapewne wynika to z ewoluowania koncepcji pracy w trakcie badań eksperymentalnych i oceny wyników. Badania przy zmiennym ciśnieniu w układzie dolotowym ujawniły problem zbyt dużej twardości pracy silnika. Z tego powodu Autor zdecydował się rozbudować zakres pracy doktorskiej o wpływ strategii wtrysku.
3. Ponadto w pracy jest brak analizy błędów; nawet sama informacja na temat dokładności użytej aparatury nie daje przecież pełnego poglądu na dokładność pomiarów.
4. Do badań wykonywanych w pracy nie zastosowano w pełni teorii planowania doświadczeń. Dodatkowo, programy do planowania badań umożliwiają skuteczną analizę statystyczną uzyskanych wyników.
5. W bardzo skromnym zakresie przedstawiono wyniki emisji związków toksycznych spalin, a to jest zasadniczym celem wprowadzania kontrolowanego samozapłonu w silnikach benzynowych.
6. Praktycznie wszystkie silniki spalinowe pracują w warunkach dynamicznych i w tych warunkach emitują najwięcej związków toksycznych oraz CO₂ (będącym wskaźnikiem zużycia paliwa). O konieczności badań tych silników w warunkach dynamicznych świadczą testy homologacyjne realizowane na hamowni podwoziowej WLTC (Worldwide harmonized Light duty Test Cycle) i WMTC (World-wide Motorcycle Emissions Test Cycle) lub silnikowej WHTC (Worldwide Heavy Duty Transient Cycle). Należałoby zatem spróbować weryfikacji osiągnięć Autora dotyczących czynników wpływających na przebieg niskotemperaturowego spalania w tłokowym silniku o kontrolowanym samozapłonie mieszanki oraz opracowania sposobów sterowania procesem roboczym, według przytoczonych powyżej testów lub opracować własny test dynamiczny, np. swobodnego przyspieszania.

Pozostałe uwagi krytyczne:

1. Wolałbym, aby wnioski z pracy były przedstawione w następującej konfiguracji:
 - wnioski ogólne,
 - wnioski szczegółowe,
 - wnioski metodyczne,
 - wnioski uytylitarne,
 - wnioski perspektywiczne;
2. Brak tytułu pracy w języku angielskim;
3. Praca jest napisana w sposób staranny, poprawnym językiem i wydana bardzo starannie edytorsko. Zdarzają się w niej jednak drobne usterki edytorskie i techniczne, takie jak:
 - zostawianie pustego miejsca na stronach, co niepotrzebnie zwiększa objętość pracy,
 - używanie popularnych (w gazetach) i nieprecyzyjnych określeń, jak np. pomijalnie

mały, prosty sposób, stosunkowo powoli, ekstremalnie, radykalnie, rysunek przedstawia (powinno być: na rysunku przedstawiono), bardzo duży, całkowicie zmienne itp.,

- bardzo częste używanie słowa „trend”.

Podsumowanie oceny merytorycznej

Mimo powyższych uwag i sugestii, niektórych dyskusyjnych, bardzo wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy i to zarówno ze względu na intelektualny wkład Autora, jak i na zakres włożonej przez Niego pracy. Uwagi te nie umniejszają mojej wysokiej oceny pracy.

Przedmiotowa rozprawa pokazuje duże możliwości niskotemperaturowych systemów spalania. Największą zaletą systemu spalania CAI jest minimalizacja emisji tlenków azotu, która jest efektem spalania niskotemperaturowego. Zasadniczym zrealizowanym przez Autora celem pracy było dostarczenie wiedzy pozwalającej na opracowanie zaawansowanych technik sterowania spalaniem CAI w zakresie zwiększonych obciążeń silnika. Aby umożliwić zmniejszenie emisji tlenków azotu oraz twardości spalania, przy zachowaniu akceptowalnych innych wskaźników pracy silnika, skuteczna okazała się redukcja ilości paliwa wtryskiwanego w początkowej fazie ujemnego współotwarcia zaworów.

Stwierdzam, że zarówno materiał badawczy jak i literaturowy został przez Autora rozprawy wykorzystany poprawnie, a na podstawie treści pracy można w sposób jednoznaczny ocenić wkład własny Doktoranta. Zawarte w pracy wyniki badań i analiz wskazują na rzetelność i dociekliwość badawczą Autora. Przedstawioną do oceny pracę można uznać za oryginalne dzieło o dużym znaczeniu dla rozwoju nowych systemów spalania.

Reasumując, wszystkie wymienione elementy pracy stanowią o jej dużej wartości merytorycznej, a zwłaszcza na uwagę zasługują następujące jej elementy:

- uzasadnienie podjęcia tematu, które wynika z wnikliwej analizy stanu wiedzy,
- trafne zdefiniowanie przedmiotu badań i celu rozprawy,
- wysoki poziom merytoryczny pracy i obeznanie z rozważaną tematyką,
- umiejętność korzystania z literatury specjalistycznej,
- przejrzysta i logicznie ułożona struktura pracy i jej cel oraz zakres.

Autor w rozprawie doktorskiej podjął się wyjątkowo trudnego i ambitnego zadania, które z oczywistych względów nie wyczerpuje całości zagadnień związanych z oceną czynników wpływających na przebieg niskotemperaturowego spalania w tłokowym silniku o kontrolowanym samozapłonie mieszanki oraz opracowaniem sposobów sterowania procesem roboczym. Zagadnienie opisywane w pracy jest skomplikowane ze względu na dużą liczbę czynników mających wpływ na badane zjawiska. Trudne jest zdecydowane wydzielenie wpływu jednego czynnika (tzw. analiza pierwiastkowa), ponieważ należy liczyć się z interakcją innych.

Należy przy tym zaznaczyć, że obecny stan wiedzy o niektórych czynnikach jest niewystarczający do pełnego ustalenia ich wpływu, stąd też tylko wybrane czynniki należy brać pod uwagę, dając możliwość uzupełnienia ich w dalszej pracy badawczej. Wynika z tego konieczność dalszych badań i analiz, które pozwolą w sposób bardziej jednoznaczny określić potencjał zaproponowanych rozwiązań „nietypowych” systemów spalania w silnikach

spalinowych.

4. PODSUMOWANIE I KONKLUZJA

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- Autor dokonał wyjątkowo trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane wymagania,
- zasadnicze cele pracy zostały w osiągnięte w zakresie przyjętym przez Doktoranta, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych i mogą służyć do dalszych prac,
- formalny układ pracy jest prawidłowy,
- dysertacja dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, a w niektórych elementach wnosi do nich nowe treści,
- znaczna akumulacja należycie ustalonych faktów sprawia, że zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych i wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną oraz umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr. inż. Michała Gęcy nt.: „Wpływ doładowania na wskaźniki pracy silnika benzynowego o kontrolowanym samozapłonie (promotor: dr hab. inż. Jacek Hunicz, prof. uczelni) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ust.1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.), a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę powyższe jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy, oczywiście pod warunkiem pozytywnego wyniku obrony doktorskiej. Uzasadnieniem wniosku jest niezwykle ważny i ciekawy kierunek rozwoju silników spalinowych, czyli dalsze możliwości zmniejszenia emisji tlenków w silniku benzynowym o kontrolowanym samozapłonie. Ograniczenie emisji tlenków azotu jest jednym z największych wyzwań stawianych silnikom dla realizacji celu „Technologies and Policies towards Zero-Impact Combustion Engines”. Problem naukowy został potraktowany w sposób nowatorski i unikatowy. Postawione zadania naukowe zostały kompleksowo zrealizowane z zastosowaniem współczesnych metod naukowych. Powyższa praca, obok aspektu naukowego, ma również bardzo ważny i wartościowy aspekt użytkowy. Jej wyniki powinny być wykorzystane w przemyśle motoryzacyjnym.